

钾肥对镉的植物有效性的影响

陈苏^{1,2}, 孙丽娜³, 孙铁珩^{1,3*}, 晁雷^{1,2}, 杨春璐^{1,2}

(1. 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039; 3. 沈阳大学环境工程重点实验室, 沈阳 100041)

摘要:采用室外盆栽模拟试验,研究了在镉单一污染及镉、铅复合污染的土壤中,钾肥(K_2SO_4)的施用及其施用水平对镉的植物有效性的影响.结果表明,施用钾肥可显著($p < 0.05$)促进小麦干重的增长,缓解重金属镉及镉、铅复合污染对小麦的毒害作用.不同施用水平的钾肥均减少了小麦对镉的吸收,降低了镉的植物有效性.随着钾肥施用水平的增加,小麦植株不同部位(根、茎叶和籽实)镉的浓度先逐渐降低而后上升,小麦植株不同部位的富集系数也呈现先降低而后上升的趋势,并且钾肥在 K_2 水平时对镉的缓解效果最佳.施用钾肥降低了根际、非根际土壤交换态镉的含量,钾肥主要影响了小麦根际、非根际土壤中交换态、碳酸盐态镉的含量,而对铁锰氧化物结合态、有机质硫化物态和残渣态镉的影响较小.镉、铅复合处理与镉单一处理相比较,铅可促进小麦对镉的吸收,提高镉的植物有效性.

关键词: 镉; 铅; 钾肥(K_2SO_4); 植物有效性

中图分类号: X131 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)01-0182-07

Influence of Potassium Fertilizer on the Phytoavailability of Cadmium

CHEN Su^{1,2}, SUN Li-na³, SUN Tie-heng^{1,3}, CHAO Lei^{1,2}, YANG Chun-lu^{1,2}

(1. Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China; 3. Key Laboratory of Environment Engineering of Shenyang University, Shenyang 100041, China)

Abstract: A field pot experiment was conducted to study the influence of potassium fertilizer (K_2SO_4) on the phytoavailability of Cd in soils with single stress of Cd and combined stress of Cd and Pb. Results showed that the application of K fertilizer could significantly ($p < 0.05$) increase the dry weight of wheat and alleviate the toxicity of Cd and Pb. K fertilizer with different levels could decrease the uptake of Cd in wheat and the Cd phytoavailability in soils. With the increase of K fertilizer levels added, Cd contents and the enrichment coefficients of Cd in different parts (root, haulm and grain) of wheat decreased gradually at first and increased later. It was suggested that at the K_2 level, K fertilizer would alleviate the Cd toxicity efficiently. And the application of K fertilizer would reduce the exchangeable fraction of Cd in rhizosphere and bulk soils. It was also illustrated in this work that the contents of exchangeable and carbonate Cd in soils were affected most by the application of K fertilizer. However, the contents of Fe-Mn oxide, organic and residual Cd in soils were less affected. Comparing combined treatment of Cd and Pb with single treatment of Cd, Pb application would increase the uptake of Cd in wheat and the Cd phytoavailability in soils.

Key words: cadmium; lead; potassium fertilizer(K_2SO_4); phytoavailability

重金属镉(Cd)被列为最危险的环境污染物之一,因其极易通过食物链在人体内积累并危害人体健康的特性,镉污染已成为国内外环境污染研究的热点^[1].土壤-植物系统对重金属的吸收、累积受诸多因素影响,如土壤水分、质地、pH 值、有机质、共存元素^[2~5]等,这方面的研究较早、较成熟.施肥是农业生产中的常规措施^[6],也是土壤-植物系统中不可缺少的因素之一,肥料的施用对植物的生长代谢有着广泛的影响,但不同土壤、环境条件下,尤其在农田生态系统中,如何合理应用肥料与重金属的交互作用,抑制和免除重金属危害,还缺乏深入系统的研究.目前,国内外学者已开展肥料的不同形态,肥料中阴、阳离子对重金属影响的研究^[7~9],也注意到它们之间的交互作用,有研究表明施用氮肥一般能提

高重金属的植物有效性^[10,11],其种类、用量可明显影响植物对镉的吸收^[12,13];磷对植物吸收镉的影响研究较多,但磷肥对植物体内镉积累的影响规律在不同研究中很不一致^[14~16];关于钾肥与重金属之间相互作用的研究相对较少,Zhu^[17]的研究表明 K 显著影响植物对 Cs 的吸收;Haghiri^[18]的研究发现施钾肥显著抑制大豆地上部对 Cd 的吸收;衣纯真^[19]研究了 3 种钾肥(KCl, K_2SO_4 , KNO_3)对水稻在不同生育期吸收累积 Cd 的影响,结果表明 Cl^- 对水稻吸收 Cd 有促进

收稿日期: 2006-02-27; 修订日期: 2006-04-25

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2004CB418506); 国家自然科学基金项目(20477029)

作者简介: 陈苏(1979~),女,博士研究生,主要研究方向为污染生态学, E-mail: mailchensu@yahoo.com.cn

* 通讯联系人, E-mail: thsun@iae.ac.cn

作用,而 SO_4^{2-} 显著降低水稻对 Cd 的吸收;而 Zhao^[20] 对 KCl, K_2SO_4 , KNO_3 3 种钾肥的比较结果显示, KCl 和 K_2SO_4 的加入明显提高了小麦对 Cd 的吸收.

钾是植物生长所必需的营养元素,同时施用钾肥也是重要的农业增产措施之一,本试验研究钾肥(K_2SO_4)的施用及其施用水平对镉污染及镉、铅复合污染土壤中镉的植物有效性的影响,这对于正确指导不同程度重金属 Cd 污染的农田中肥料的施用将很有必要,对于减轻土壤污染、改良土壤、减少重金属进入食物链,从而提高食物的安全性有着至关重要的意义.

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤为草甸棕壤,采自中国科学院沈阳生态站,此地块为休耕地,未使用农业化学品已 10 a,属清洁土壤,采样深度为 0~20 cm(表层土),其基本理化性质见表 1.

表 1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of the tested soil							
pH	速效钾	有机质	机械组成/%			重金属含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	
	/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	/%	砂粒	粉粒	粘粒	Cd	Pb
6.5	66.9	1.55	21.4	46.5	32.1	0.12	18.35

供试植物:小麦(*Triticum aestivum*, L.),品种为辽春 10 号,由辽宁省农业科学院提供.

供试药品:铅为 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ (分析纯);镉为 $\text{CdCl}_2\cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ (分析纯);钾为 K_2SO_4 (分析纯).

1.2 试验设计

1.2.1 盆栽试验

Cd 污染的处理浓度为:0, 5, 25 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,分别记作 CK, T1, T2; Cd、Pb 复合处理浓度为: $\text{Cd} + \text{Pb} = (5 + 500) \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $(25 + 1\,000) \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,分别记作 T3, T4; 污染物的具体投加量如表 2 所示. 钾(K_2SO_4)的施用水平为:0, 50, 100, 200, 400 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (以 K_2O 计),分别记作 K0, K1, K2, K3, K4, 总计 25 个处理,每个处理 3 次重复.

表 2 土壤中铅、镉的投加量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 2 Additional concentrations of Cd, Pb in soils / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$					
元素	CK	T1	T2	T3	T4
Cd	0.00	5.00	25.00	5.00	25.00
Pb	0.00	0.00	0.00	500.00	1\,000.00

试验用陶瓷盆钵高 20 cm,直径 15 cm,土样过 2 mm 筛后拌入污染物和钾肥,同时将 $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$,

$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 作为基肥施入,浓度为 $\text{N } 200 \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $\text{P}_2\text{O}_5 \text{ } 100 \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 重金属与土壤充分混匀后装入盆钵,每盆装土 2.5 kg,平衡 2 周后再次混匀,以保证其均匀性.

小麦种子经消毒催芽后,每盆播 15 粒,出苗后每盆保苗 10 株,每日以蒸馏水浇灌,小麦生长过程中,土壤始终保持约 60% 田间持水量,并采用物理方法除虫,以避免农药、杀虫剂等物质带来的干扰,小麦于成熟期收获取样.

1.2.2 样品采集与制备

植株取样后先用自来水冲洗,再用去离子水冲洗干净.量取小麦株高后称其鲜重,将鲜样烘干至恒重后称其干重.分别收集小麦根际、非根际土壤,样品风干后,用于镉的形态分析;另取新鲜土样保存于冰箱中,用于测定土样 pH 值.

1.3 分析方法

土壤基本理化性质按土壤农化常规分析法测定^[21].

植物样品中镉的分析:将小麦植株分为根、茎叶、籽实 3 部分,样品粉碎后,用硝酸-高氯酸消化,原子吸收分光光度仪测定待测液中镉浓度^[22].

镉形态分析的方法:采用 Tessier^[23] 法对土壤中的镉元素进行形态分级.

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 和 SPSS11.5 进行有关数据的计算、统计与处理.

2 结果与讨论

2.1 钾肥施用水平对小麦干重的影响

钾肥不同施用水平下小麦的干重如表 3 所示. 所有处理中钾肥的施用水平对小麦干重均产生了显著影响($p < 0.05$),即随钾肥施用水平的提高,小麦干重显著($p < 0.05$)增加,在 K 肥的最高用量(K4 水平)下达到最大值;从小麦生长状况看,施用钾肥对重金属污染所造成的小麦毒害症状具有一定的缓解作用,这表明在镉及镉、铅复合污染土壤中,施用钾肥可增强小麦抗逆性,促进小麦生长,进而增加小麦干重.

用对照(CK)与各组处理(T1~T4)小麦干重的差值除以对照(CK)的小麦干重,计算出不同处理中小麦干重下降的百分数(如表 4 所示).例如单一镉污染 T1 和 T2 这 2 组处理,在 K0 处,小麦干重分别比对照(CK)降低 8.00% 和 19.51%,在 K1 处,分别比对照降低 5.14% 和 17.16%,T2 处理所引起小麦

干重下降的程度均大于 T1 处理;镉、铅复合处理中,相同 K 施用水平下,T4 处理小麦干重下降的百分数均大于 T3 处理,这主要是因为土壤中污染物镉的投加浓度愈大,对小麦的毒害作用也愈大,导致小麦干重下降的程度就愈大.

表 3 钾肥不同施用水平下小麦的干重/ $\text{g}\cdot\text{盆}^{-1}$
Table 3 Dry weights of wheat under different levels of K fertilizer / $\text{g}\cdot\text{pot}^{-1}$

处理	K0	K1	K2	K3	K4
CK	9.38	9.73	10.78	11.25	11.68
T1	8.63	9.23	9.81	9.99	10.41
T2	7.55	8.06	8.49	8.80	9.60
T3	7.73	8.69	9.35	9.66	10.19
T4	6.20	6.54	6.56	6.84	7.66

表 4 钾肥不同施用水平下各处理(T1 ~ T4)小麦的干重与对照(CK)相比,干重下降的百分数/%

Table 4 Degraded percent of dry weights of wheat in different treatments (T1 ~ T4) compared with contrast (CK) under different levels of K fertilizer/%

处理	K0	K1	K2	K3	K4
T1	8.00	5.14	9.00	11.20	10.87
T2	19.51	17.16	21.24	21.78	17.81
T3	17.59	10.69	13.27	14.13	12.76
T4	33.90	32.79	39.15	39.20	34.42

此外,将单一镉污染与镉、铅复合污染(T1 和 T3,T2 和 T4)的小麦干重加以比较,不难看出,镉、铅复合污染下小麦干重都明显低于镉单一污染,镉、铅共存明显加重重金属对小麦生长的抑制及毒害作用,导致小麦干重急剧下降,说明镉、铅复合对植物的毒害作用远远大于单一镉污染.由表 3、4 的数据可以得出各组处理在施钾量相同时对小麦干重的影响顺序及程度: $T4 > T2 > T3 > T1 > CK$.

2.2 钾肥施用水平对小麦体内 Cd 浓度与分布的影响

外源重金属 Cd 进入土壤后,作物通过根系代谢作用吸收土壤中的 Cd,进入根细胞内的 Cd 一部分会滞留在根中,还有一部分可随原生质流动运移至临近细胞,并通过细胞之间的运输,输送到导管中,随作物蒸腾作用向地上部移动,并积累在作物茎叶、籽实中^[24].Cd 进入小麦体后在植物不同部位进行再分配,小麦植株不同部位 Cd 的浓度见表 5 所示.

由表 5 可知,重金属 Cd 被小麦吸收后,大部分停留在根部,少量向地上部分迁移.Cd 在小麦植株不同部位的浓度顺序为:根 > 茎叶 > 籽实,此结果与莫争^[25]研究结果一致,即重金属在植物体内的分布规律是在新陈代谢旺盛的器官蓄积量较大,而营养储存器官,如籽实中的蓄积量则较少.

表 5 钾肥不同施用水平对小麦不同部位 Cd 浓度的影响
Table 5 Effects of different levels of K fertilizer on concentrations of Cd in different parts of wheat

处理	K 水平	Cd 浓度/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$		
		根	茎叶	籽实
CK	K0	1.13	0.39	0.11
	K1	0.67	0.36	0.10
	K2	1.00	0.30	0.10
	K3	0.40	0.24	0.09
	K4	1.11	0.26	0.10
T1	K0	27.15	11.26	1.65
	K1	22.79	8.34	1.13
	K2	18.69	7.06	0.57
	K3	20.65	7.59	0.64
	K4	24.65	8.91	1.37
T2	K0	63.14	21.43	4.47
	K1	63.36	19.56	3.47
	K2	48.03	17.89	3.39
	K3	52.69	18.69	3.63
	K4	63.09	19.97	3.69
T3	K0	36.82	13.97	2.07
	K1	29.58	10.57	1.89
	K2	21.92	7.53	1.61
	K3	23.32	8.65	1.65
	K4	30.15	11.41	1.91
T4	K0	74.38	29.10	5.14
	K1	72.46	26.35	3.87
	K2	62.03	24.33	3.50
	K3	73.13	22.79	4.34
	K4	73.98	24.41	4.63

对照(CK)处理中,钾肥的施用水平对小麦不同部位(根、茎叶、籽实)的镉浓度未产生明显影响;镉单一污染处理中(T1, T2),随钾肥用量的增加,小麦不同部位(根、茎叶、籽实)的镉浓度逐渐下降,K2 处达最小值,之后随着施钾量进一步增加,镉浓度逐渐上升.镉、铅复合污染处理中(T3, T4),小麦根、茎叶及籽实对镉的吸收亦都是随钾肥用量的增加先逐渐降低而后上升.总体上,施用钾肥对清洁土壤(CK 处理)小麦体内镉的浓度影响不大,T1 ~ T4 处理在施用不同水平的钾肥以后小麦植株不同部位的镉浓度均要低于未施用钾肥的 K0 处理,说明施钾肥可减少污染土壤中小麦对镉的吸收,但并非钾肥用量越多越好,本试验条件下,K2 用量的效果最佳.

此外,无论镉单一处理(CK, T1, T2),还是镉、铅复合处理(CK, T3, T4),随土壤中镉的投加量的提高,小麦体内镉的浓度是急剧升高的;将镉单一污染及镉、铅复合污染 2 类处理(T1 和 T3,T2 和 T4)加以比较,相同钾肥用量下,镉、铅复合处理中小麦体内镉的浓度大于镉的单一处理,即 Cd-Pb 2 种元素交互作用时,Pb 的存在促进小麦对 Cd 的吸收,这一现

象在王新^[24]的研究中也得到了证实.

2.3 钾肥施用水平对小麦富集系数的影响

为明确观察不同处理的土壤中,重金属 Cd 的迁移特性,计算出 Cd 在小麦根、茎叶、籽实中的富集系数,也就是小麦植株不同部位 Cd 浓度与土壤中 Cd 浓度之比(见表 6).富集系数可用来表征土壤-植物系统中镉的迁移程度,通过小麦不同部位富集系数的比较,富集系数:根 > 茎叶 > 籽实,说明 Cd 进入小麦体内主要富集在作物根部,而在籽实中的富集则很少.

镉单一处理(CK, T1, T2)中,伴随钾肥用量的增长小麦根部镉的富集系数先降低而后增大,茎叶、籽实的富集系数也呈现出先降低而后增大的趋势;镉、铅复合处理中(T3, T4),钾肥的施用同样降低了小麦不同部位的富集系数.所有施用钾肥处理(K1 ~ K4)的小麦不同部位的富集系数均要小于未施钾肥 K0 处理,这进一步表明施用钾肥降低了小麦植株体内镉的迁移程度.

同时,从表 6 可知,钾肥相同用量时,随 CK, T1 和 T2 3 组处理中镉的投加浓度($Cd = 0, 5, 25\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)的增大,小麦植株不同部位对镉的富集系数呈现下降趋势; T4 [$Cd + Pb = (25 + 1\,000)\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$]的污染程度大于 T3 [$Cd + Pb = (5 + 500)\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$],但其各部位对镉的富集系数却小于 T3.上述现象主要是由于随着重金属投加量的增大,毒性的增强,小麦植株本能运用自我调节机制来降低对有毒污染物的吸收,植物对重金属的吸收并不是无限的、被动的,遇到高浓度或重金属复合污染等恶劣环境时,可本能地抑制重金属向上部输送,保护地上部不受或少受毒害.

镉单一及镉、铅复合 2 类处理(T1 和 T3, T2 和 T4),镉、铅共存时,Pb 的存在提高了 Cd 在小麦植株不同部位的富集系数(表 6),这是由于 Cd-Pb 交互作用时,Pb 促进了小麦根、茎叶等部位对 Cd 的吸收,其原因在于 Cd、Pb 共存时,土壤对 Pb 具有很强的吸附能力,使 Pb 更易于固定在土壤中,难于迁移,而 Pb 可夺取 Cd 在土壤中的吸附位,使 Cd 活性增加,提高土壤中 Cd 的有效性,使得 Cd 更易于被小麦所吸收^[24].

2.4 钾肥对小麦根际、非根际土壤中镉形态分布的影响

土壤中重金属镉的形态可分为以下 5 种:A 为交换态;B 为碳酸盐态;C 为铁锰氧化物结合态;D 为有机质硫化物态;E 为残渣态.表 7 列出了钾肥不

表 6 钾肥不同用量下小麦不同部位对镉的富集系数
Table 6 Enrichment coefficients of Cd in different parts of wheat under different levels of K fertilizer

处理	K 水平	富集系数		
		根	茎叶	籽实
CK	K0	9.83	3.39	0.96
	K1	5.83	3.13	0.87
	K2	8.70	2.61	0.87
	K3	3.48	2.09	0.78
	K4	9.65	2.26	0.87
T1	K0	5.43	2.25	0.33
	K1	4.56	1.67	0.23
	K2	3.74	1.41	0.11
	K3	4.13	1.52	0.13
	K4	4.93	1.78	0.27
T2	K0	2.53	0.86	0.18
	K1	2.53	0.78	0.14
	K2	1.92	0.72	0.14
	K3	2.11	0.75	0.15
	K4	2.52	0.80	0.15
T3	K0	7.36	2.79	0.41
	K1	5.92	2.11	0.38
	K2	4.38	1.51	0.32
	K3	4.66	1.73	0.33
	K4	6.03	2.28	0.38
T4	K0	2.98	1.16	0.21
	K1	2.90	1.05	0.15
	K2	2.48	0.97	0.14
	K3	2.93	0.91	0.17
	K4	2.96	0.98	0.19

同施用水平下小麦根际与非根际土壤中镉的形态分布.首先,在对照 CK 处理中,镉的主要存在形态是以残渣态 E 为主,交换态 A 含量较少(本研究中未检出,数据未列出);其次,在 T1 ~ T4 4 组投加外源镉的处理中,镉的主要存在形态均以交换态 A 为主,碳酸盐态 B 和铁锰氧化物结合态 C 居中,其次为残渣态 E,而有机质硫化物态 D 含量最少,即 $A > B, C > E > D$;钾肥的施用水平对上述镉的 5 种形态的分布顺序并未产生影响.

镉的 5 种形态在小麦根际与非根际土壤中存在一定的差异.在 T1 和 T3 低浓度镉 [$Cd = 5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; $Cd + Pb = (5 + 500)\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$]处理中,根际与非根际土相比,交换态 A、碳酸盐态 B 及有机质硫化物态 D 的含量有所下降,而铁锰氧化物结合态 C 和残渣态 E 的含量上升,这主要是由于小麦根际的吸收作用所引起的;但在 T2 和 T4 高浓度镉 [$Cd = 25\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; $Cd + Pb = (25 + 1\,000)\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$]处理中,根际与非根际土比较,交换态 A 含量上升,而碳酸盐态 B 和残渣态 E 含量有所降低,这表明在高浓度镉处理中,小麦根际活化作用强烈,交换态镉的多少可

表 7 钾肥不同施用水平下小麦根际、非根际土壤中镉的形态分布¹⁾/mg·kg⁻¹

Table 7 Speciation distribution of Cd in rhizosphere and bulk soils of wheat under different levels of K fertilizer/mg·kg⁻¹

处理	形态	T1		T2		T3		T4	
		非根际	根际	非根际	根际	非根际	根际	非根际	根际
K0	A	2.32	2.00	15.60	17.24	2.50	2.34	15.96	17.27
	B	1.47	1.15	5.34	3.59	1.54	1.24	5.78	3.35
	C	0.59	0.81	3.19	3.14	0.53	0.81	2.83	3.05
	D	0.36	0.23	0.37	0.20	0.16	0.05	0.34	0.34
	E	0.35	0.71	1.03	0.82	0.35	0.53	1.05	0.99
	总和	5.09	4.90	25.53	25.00	5.09	4.98	25.96	25.00
K1	A	2.10	1.60	15.36	16.43	2.27	1.76	15.83	17.01
	B	1.47	1.16	5.28	4.62	1.70	1.37	4.77	3.66
	C	0.64	1.09	3.22	3.21	0.52	1.19	2.68	3.44
	D	0.31	0.24	0.34	0.12	0.12	0.10	0.29	0.14
	E	0.44	0.90	1.11	0.62	0.41	0.89	1.11	0.79
	总和	4.96	4.99	25.32	25.01	5.03	5.31	24.68	25.04
K2	A	1.77	1.31	14.16	15.60	1.93	1.54	15.47	15.63
	B	1.63	1.28	4.82	4.73	1.76	1.38	5.19	4.61
	C	0.68	1.14	4.62	3.60	0.62	1.22	3.21	3.79
	D	0.38	0.26	0.34	0.26	0.19	0.13	0.28	0.40
	E	0.46	1.01	0.84	0.71	0.44	1.01	1.16	0.88
	总和	4.92	5.00	24.77	24.90	4.92	5.30	25.30	24.67
K3	A	2.06	1.35	14.46	15.96	2.19	2.18	15.75	15.98
	B	1.44	1.26	4.86	4.47	1.65	1.15	5.09	4.21
	C	0.64	1.09	4.60	3.43	0.57	0.72	3.08	3.66
	D	0.31	0.31	0.40	0.31	0.17	0.10	0.25	0.38
	E	0.44	1.00	1.02	0.73	0.43	0.85	1.17	0.82
	总和	4.90	5.00	25.34	24.89	5.01	5.00	25.33	25.05
K4	A	1.98	1.39	14.27	16.31	2.03	2.01	15.61	17.01
	B	1.62	1.25	5.03	4.46	1.77	1.13	5.36	3.66
	C	0.66	1.13	5.00	3.30	0.58	0.60	2.99	3.44
	D	0.29	0.25	0.45	0.08	0.27	0.20	0.33	0.14
	E	0.47	0.97	1.19	0.85	0.47	1.06	1.03	0.79
	总和	5.01	4.99	25.94	25.00	5.12	5.00	25.31	25.04

1) A 为交换态;B 为碳酸盐态;C 为铁锰氧化物结合态;D 为有机质硫化物态;E 为残渣态

能取决于植物吸收以及活化和非根际向根际迁移的速率之和^[26],高浓度时,一方面可能由于土体中可活化的镉含量较高(试验中以CdCl₂·2.5H₂O形态施入),另一方面可能由于高浓度镉的胁迫,根系渗漏加剧,导致活化过程强烈^[26],使活化和非根际向根际迁移的速率之和大于植物吸收,进而产生根际土中交换态 A 含量升高的现象。

另外,镉单一与镉、铅复合处理(T1 和 T3,T2 和 T4)相比较,Cd-Pb 共存使小麦根际、非根际土交换态 A 含量均比 Cd 单一处理时有所提高,由于交换态也是最易被植物吸收的部分,这样 Pb 的存在很可能提高 Cd 的植物有效性,其原因可由土壤吸附动力学解释^[26],动力学试验表明,Cd-Pb 混合流出液中的 Cd 很快就达到了平衡,甚至在一定时间区段内超过了起始浓度,这是由于后来吸附的 Pb 替代了原已吸附的 Cd,而溶液中仅含 Cd 时达到平衡的时间较长,

所以 Pb 使 Cd 活性增加.这与本文前面得出的 Pb 促进小麦对 Cd 的吸收的结论相符。

T1 ~ T4 4 组处理中,钾肥降低了根际、非根际土中交换态 A 含量,其变化趋势是随钾肥用量的增加,根际、非根际土中交换态 A 含量先逐渐减小而后增大,根际土中碳酸盐态 B 含量先升高再逐渐降低;而施用钾肥对铁锰氧化物结合态 C、有机质硫化物态 D、残渣态 E 的影响则较小(表 7)。小麦收获后,根际、非根际土 pH 值的测定结果(数据未列出)表明,施用钾肥对根际、非根际土壤 pH 值无显著($p > 0.05$)影响,说明施用钾肥对镉形态分布产生的影响并非由施肥造成土壤 pH 变化所引起的。张晓岭^[27]对 3 种土壤(红壤、水稻土、潮土)的研究结果显示,与不施钾肥的对照相比,以 KCl 形式施入钾肥提高了水稻土、潮土中交换态镉含量,而以 K₂SO₄ 形式施入钾肥都降低了 3 种土壤中交换态镉的含量。

本试验中 K_2SO_4 的不同施用水平降低了根际、非根际土壤交换态镉的含量,由于交换态镉是最易被植物吸收的,笔者推断很可能是 SO_4^{2-} 与 Cd 的交互作用引起土壤交换态镉含量的下降,进而降低了镉的植物有效性.

钾肥对 Cd 植物有效性的影响可能是以下几方面原因综合作用的结果.首先,土壤重金属污染对植物的胁迫通常会造成营养元素的缺乏^[28],进而间接影响植物正常生长,而 K 是植物生长所必需的大量营养元素之一,在镉及镉、铅复合污染土壤中添加钾的施用水平可提高植物抗逆性,促进植物生长,增加植物干重,从而降低植株体内镉的浓度,但钾肥降低镉的植物有效性并非仅通过 K 促进植株生长产生的稀释效应来实现的.其次,肥料中的伴随离子 SO_4^{2-} 对镉植物有效性的影响. Sparrow^[29] 和 Grant^[30] 分别对马铃薯和大麦的研究表明,以 KCl 形式施入钾肥,马铃薯块茎和大麦籽实中 Cd 的浓度均有提高,而以 K_2SO_4 形式施入钾肥,马铃薯块茎、叶柄中 Cd 浓度比 KCl 处理时下降了 20% ~ 30%. 衣纯真^[19] 研究 3 种钾肥(KCl, K_2SO_4 , KNO_3)对水稻吸收累积 Cd 的影响,结果表明 Cl^- 对水稻吸收 Cd 有促进作用,而 SO_4^{2-} 显著降低水稻对 Cd 的吸收,这是因为 Cl^- 在溶液中能形成相对稳定的络合物(如 $CdCl^+$ 、 $CdCl_2^0$ 等形式),使 Cd 趋向于由固态向土壤溶液迁移,提高了 Cd 的溶解性;淹水栽培条件下,由于 SO_4^{2-} 的转化,与 Cd^{2+} 形成 CdS 沉淀而降低了土壤中 Cd 的有效性,减少水稻对 Cd 的吸收. McLaughlin^[31,32] 采用溶液与土培 2 种方式的研究表明 SO_4^{2-} 对植物吸收 Cd 没有明显的促进作用,认为 SO_4^{2-} 与 Cd 的络合物不像 Cl^- 与 Cd 的络合物那样稳定, SO_4^{2-} 不会像 Cl^- 那样对植物吸收 Cd 产生影响.目前,普遍认为 KCl 可促进植物对镉的吸收, Tu^[33] 的研究也证实土壤中加入 KCl 室温下培养 3 个月,土壤中交换态镉含量上升,进而提高镉的有效性;而有关 SO_4^{2-} 对镉植物有效性的影响存在的看法并不一致.

本试验施入 K_2SO_4 均显著提高小麦干重,虽然小麦植株不同部位镉的浓度随着钾施用水平的升高先逐渐下降而后上升,但是钾的不同施用水平均减少了小麦体内镉的浓度,降低了镉的植物有效性.此结果与杨锚^[34] 的研究结果一致,其研究表明,镉污染土壤上,旱田作物如油菜、小白菜,施加 KNO_3 能有效避免镉污染毒害,而 K_2SO_4 能有效促进小白菜

生长、降低其体内镉的含量从而降低镉污染毒害;水田中, KNO_3 虽然降低了水稻对镉的吸收和累积,但其显著降低了水稻生物量,而 K_2SO_4 在水田中的施用提高了水稻产量,同时有效降低镉污染的危害.

最近 Zhao^[20] 对 K_2SO_4 、KCl 和 KNO_3 3 种钾肥进行的比较结果显示, KCl 和 K_2SO_4 均明显提高了小麦对 Cd 的吸收,且随着 KCl 和 K_2SO_4 质量分数的升高,小麦干重明显下降,小麦幼苗茎中 Cd 质量分数也随着升高.上述研究与本试验的结果有所不同,关于上述不同现象的原因笔者进行了分析:两者所采用的供试土壤(前者为壤质土,本试验为草甸棕壤)、小麦品种(前者为 Brookton 和 Krichauff,本试验为辽春 10 号)的差异是一方面原因;植物不同生长期对 Cd 的吸收、累积会有所差别^[35,36],前者于幼苗时收获,而本试验于成熟期收获;此外,由土壤中速效钾含量(前者^[20] 为 $198.7\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,本试验为 $66.9\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)的对比可知,本试验采用的土壤中速效钾含量较少,因而钾肥的施用显著提高了小麦的生物量.

3 结论

(1) 土培条件下,施用钾肥(K_2SO_4)可显著促进小麦干重的增长,缓解重金属镉及镉、铅复合污染对小麦的毒害作用.钾肥的不同施用水平均减少了小麦对镉的吸收,降低了镉的植物有效性,随着钾肥施用水平的逐渐增加,小麦植株不同部位的镉的浓度与富集系数均呈现出先逐渐降低而后上升的趋势,并且钾肥在 K2 水平时对镉的缓解效果最佳.

(2) 钾肥(K_2SO_4)的施用降低了根际、非根际土壤交换态镉的含量,钾肥主要影响了小麦根际、非根际土壤中交换态、碳酸盐态镉的含量,而对铁锰氧化物结合态、有机质硫化物态和残渣态镉的影响较小.

(3) 镉、铅复合处理与镉单一处理相比较,镉、铅共存时,铅可促进小麦对镉的吸收,提高镉的植物有效性.

参考文献:

[1] 赵中秋,朱永官,蔡运龙. 镉在土壤-植物系统中的迁移转化及其影响因素[J]. 生态环境,2005,14(2):282 ~ 286.

[2] 李瑛,张桂银,李洪军,等. 有机酸对根际土壤中铅形态及其生物毒性的影响[J]. 生态环境,2004,13(2):164 ~ 166.

[3] Renella G, Landi L, Nannipieri P. Degradation of low molecular weight organic acids complexed with heavy metals in soil [J]. Geoderma, 2004, 122: 311 ~ 315.

[4] Appel C, Ma L. Concentration, pH, and surface charge effects on cadmium and lead sorption in three tropical soils [J]. J. Environ. Qual., 2002, 31: 581 ~ 589.

- [5] Daniel G, Strawn, Sparks D L. Effects of soil organic matter on the kinetics and mechanisms of Pb (II) sorption and desorption in soil [J]. Soil Sci. Soc. Am., 2000, **64**: 144 ~ 156.
- [6] Lavadol R S, Porcelli C A, Alvarez R. Nutrient and heavy metal concentration and distribution in corn, soybean and wheat as affected by different tillage systems in the Argentine Pampas [J]. Soil and Tillage Research, 2001, **62**: 55 ~ 60.
- [7] Chien S H, Carmona G, Prochnow L I, *et al.* Cadmium availability from granulated and bulk-blended phosphate-potassium fertilizers [J]. Journal of Environmental Quality, 2003, **32**(5): 1911 ~ 1914.
- [8] Benaissa H, Benguella B. Effect of anions and cations on cadmium sorption kinetics from aqueous solutions by chitin: experimental studies and modeling [J]. Environmental Pollution, 2004, **130**: 157 ~ 163.
- [9] Salah S A, Barrington S F. Effect of soil fertility and transpiration rate on young wheat plants (*Triticum aestivum*) Cd/Zn uptake and yield [J]. Agricultural Water Management, 2006, **82**: 177 ~ 192.
- [10] Erika Klang-Westin, Perttu K. Effects of nutrient supply and soil cadmium concentration on cadmium removal by willow [J]. Biomass and Bioenergy, 2002, **23**: 415 ~ 426.
- [11] 聂俊华, 刘秀梅, 王庆仁. 营养元素 N、P、K 对 Pb 超富集植物吸收能力的影响 [J]. 农业工程学报, 2004, **20**(5): 262 ~ 265.
- [12] Tsadilas C D, Karaivazoglou N A, Tsotsolis N C, *et al.* Cadmium uptake by tobacco as affected by liming, N form, and year of cultivation [J]. Environmental Pollution, 2005, **134**: 239 ~ 246.
- [13] Mair N A, McLaughlin M J, Heap M, *et al.* Effects of nitrogen source and calcium lime on soil pH and potato yield, leaf chemical composition, and tuber cadmium concentrations [J]. J. Plant Nutr., 2002, **25**(3): 523 ~ 544.
- [14] 李波, 青长乐, 周正步, 等. 肥料中氮磷和有机质对土壤重金属行为的影响及在土壤治污中的应用 [J]. 农业环境保护, 2000, **19**(6): 375 ~ 377.
- [15] Maier N A, McLaughlin M J, Heap M, *et al.* Effect of current-season application of calcitic lime and phosphorus fertilization on soil pH, potato growth, yield, dry matter content, and cadmium concentration [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2002, **33** (13-14): 2145 ~ 2165.
- [16] Chen M, Ma L Q, Singh S P, *et al.* Field demonstration of in situ immobilization of soil Pb using P amendments [J]. Advances in Environmental Research, 2003, **8**: 93 ~ 102.
- [17] Zhu Y G, Shaw G, Nisbet A F, *et al.* Effect of potassium supply on the uptake of ^{137}Cs by spring wheat (*Triticum aestivum*, cv. *Tonic*): a lysimeter study [J]. Radiat Environ. Bioph., 2000, **39**: 283 ~ 290.
- [18] Haghiri F. Release of cadmium from clays and plant uptake of cadmium from soil as affected by potassium and cadmium amendments [J]. J. Environ. Qual., 1976, **5**: 395 ~ 397.
- [19] 衣纯真, 傅桂平, 张福锁. 不同钾肥对水稻镉吸收和运移的影响 [J]. 中国农业大学学报, 1996, **1**(3): 65 ~ 70.
- [20] Zhao Z Q, Zhu Y G, Li H Y, *et al.* Effects of forms and rates of potassium fertilizers on cadmium uptake by two cultivars of spring wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. Environment International, 2003, **29**: 973 ~ 978.
- [21] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [22] Wei S H, Zhou Q X. Identification of weed species with hyperaccumulative characteristics of heavy metals [J]. Prog. Nat. Sci., 2004, **14**(6): 495 ~ 503.
- [23] Tessier A, Campbell P G C, Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals [J]. Analytical Chemistry, 1979, **51**(7): 844 ~ 851.
- [24] 王新, 梁仁禄, 周启星. Cd-Pb 复合污染在土壤-水稻系统中生态效应的研究 [J]. 农村生态环境, 2001, **17**(2): 41 ~ 44.
- [25] 莫争, 王春霞, 陈琴, 等. 重金属 Cu, Pb, Zn, Cr, Cd 在水稻植株中的富集和分布 [J]. 环境化学, 2002, **21**(2): 110 ~ 116.
- [26] 林琦, 陈怀满, 郑春荣, 等. 根际和非根际土中铅、镉行为及交互作用的研究 [J]. 浙江大学学报 (农业与生命科学版), 2000, **26**(5): 527 ~ 532.
- [27] 张晓岭. NPK 肥料对土壤中 Cd、Pb 形态变化及吸附解吸的影响 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2003. 15 ~ 42.
- [28] Tahar G, Issam N, Ines S, *et al.* Cadmium effects on growth and mineral nutrition of two halophytes: *Sesuvium portulacastrum* and *Mesembryanthemum crystallinum* [J]. Journal of Plant Physiology, 2005, **162**: 1133 ~ 1140.
- [29] Sparrow L A, Saladini A A, Johnstone J. Field studies of Cd in potatoes (*Solanum tuberosum* L.): III. Response of cv. Russet Burbank to sources of banded potassium [J]. Australian Journal of Agricultural Research, 1994, **45**: 243 ~ 249.
- [30] Grant C A, Bailey L D, Therrien M C. Effect of N, P, and KCl fertilizers on grain yield and Cd concentration of malting barley [J]. Fertilizer Research, 1996, **45**: 153 ~ 161.
- [31] McLaughlin M J, Andrew S J, Smart M K, *et al.* Effects of sulfate on cadmium uptake by Swiss chard: I. Effects of complexation and calcium competition in nutrient solutions [J]. Plant Soil, 1998, **202**: 211 ~ 216.
- [32] McLaughlin M J, Lambrechts R M, Smolders E, *et al.* Effects of sulfate on cadmium uptake by Swiss chard: II. Effects due to sulfate addition to soil [J]. Plant Soil, 1998, **202**: 217 ~ 222.
- [33] Tu C, Zheng C R, Chen H M. Effect of applying chemical fertilizers on forms of lead and cadmium in red soil [J]. Chemosphere, 2000, **41**: 133 ~ 138.
- [34] 杨锚. 不同氮钾肥对铅镉污染土壤铅镉有效性的影响 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2004. 45 ~ 65.
- [35] 徐晓炎. 土壤中镉的吸附解吸特性及其对水稻吸收镉的影响 [D]. 南京: 南京农业大学, 2004. 4 ~ 9.
- [36] 姜丽娜, 邵云, 李春喜, 等. 镉在小麦植株体内的吸收、分配和累积规律研究 [J]. 河南农业科学, 2004, **7**: 13 ~ 17.